

# 博士学位論文審査要旨

2020年1月14日

論文題目: Study on Effects of Submicron Glass Fiber Modification on Mechanical Properties of Vinyl Ester Resin and Short Carbon Fiber Reinforced Vinyl Ester Composite

(ビニルエステル樹脂および短炭素繊維強化ビニルエステル複合材料の機械的特性のサブミクロンガラス繊維による改質効果に関する研究)

学位申請者: NGUYEN NHAN THI THANH

審査委員:

主査:	理工学研究科	教授	大窪 和也
副査:	理工学部	教授	笹田 昌弘
副査:	理工学部	准教授	小武内 清貴

要旨:

炭素繊維強化複合材料はその強化繊維を短繊維化する事で廉価で、汎用性や賦形性に富んだ多用途材料と成りうる材料であるが、特にその強化繊維の線維端となる不連続部を起点とする損傷の事例が多く、その抑制による機械的特性の改善が期待されている。本研究は、比較的廉価で汎用材料から製造される短炭素繊維強化ビニルエステル複合材料に対して、同じく汎用のガラス繊維素材から製造されるサブミクロンガラス繊維を添加した場合の同材料の機械的特性の改善効果を詳細に議論している。研究では母材への添加率をわずかに0.3 wt% and 0.6 wt%とした上で、母材に添加する微細ガラス繊維の長さ/直径比であるアスペクト比を広い範囲で変更し、その改善効果を示している。また単純な材料強度だけではなく、衝撃強度、モードIじん性値、引張—引張疲労寿命、引張—引張き裂進展抵抗、CAI 強度と呼ばれる衝撃損傷後の圧縮強度などに対する効果も詳細に検証している。

この研究をまとめた論文は全5章からなる。第1章では緒論として、高分子系複合材料全般が取り巻く課題の中でも特に、短繊維を用いる複合材料が持つ問題点や期待される特性が紹介されている。加えてそれを改善するために従来に行われてきた技術が紹介され、その不足点の議論を経て、研究の目的を設定している。

第2章ではまず、本研究で対象としている複合材料の母材となるビニルエステル自体の力学特性へのサブミクロンガラス繊維の添加の効果を調査している。評価項目として、3点曲げ強度、アイゾット衝撃強度、損失弾性率、損失正接、破壊じん性値などが用いられ、多彩な機械的特性の変化が調べられている。またこの段階で、サブミクロンガラス繊維を液体のビニルエステル中に添加し予め分散させておく手法を確立している。

第3章では前節で確立した手法により用意した改質ビニルエステルを母材とする短炭素繊維強化複合材料を自作し、作成した複合材料の機械的性質に及ぼす前述の添加の効果を議論している。また前節で示された機械的特性だけではなく、複合材料中のボイド率や強化繊維先端でのひずみ分布の変化、Micro drop test による界面強度、および繰り返し負荷を受けた場合の疲労寿命の変化も調査している。

第4章では本研究で採用した手法の効果をより詳細に議論するために、さらに Drop weight impact test (落錘試験)、CAI (Compression After Impact) test (衝撃後圧縮試験)、Inspection

test (探傷試験) などが行われている。

研究の結果まず、短炭素繊維強化ビニルエステル之母材にサブミクロンガラス繊維を有効的に分散させるには、汎用ホモジナイザを用いて 5000 rpm で 30 分の操作が有効である事を示している。またその複合材料の疲労耐久寿命を含めて多くの機械的特性を改善するための条件として、母材に添加する微細ガラス繊維には約 3mm の臨界長が統一的に存在する事を示し、その適当な条件下ではランダム短繊維系の複合材料特有の強化繊維先端での応力集中状態が解消される事を明らかにしている。さらに微細繊維の介在により、マイクロクラックの進展方向の偏向やその遅延の効果が得られる事も明らかにしている。最後に本手法を利用し、一般には大きく異なる衝撃損傷後の引張強度と圧縮強度の相違比を 0.85 程度にまで均等化される事も示している。

このように本論文は、短炭素繊維で強化された汎用的な複合材料の疲労耐久性を含めた機械的特性を比較的平易に改善するための有効な知見とその実際的な手法を提案検証しており、複合材料を利用する工業分野において価値ある成果を得ている。よって、本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2020年1月14日

論文題目： Study on Effects of Submicron Glass Fiber Modification on Mechanical Properties of Vinyl Ester Resin and Short Carbon Fiber Reinforced Vinyl Ester Composite

(ビニルエステル樹脂および短炭素繊維強化ビニルエステル複合材料の機械的特性のサブミクロンガラス繊維による改質効果に関する研究)

学位申請者： NGUYEN NHAN THI THANH

審査委員：

主査：	理工学研究科	教授	大窪 和也
副査：	理工学部	教授	笹田 昌弘
副査：	理工学部	准教授	小武内 清貴

要旨：

本論文の提出者は、2008年8月にHanoi University of Science and Technologyの学部の卒業後、ベトナムの日系企業にて勤務し、その後、同大学大学院の修士課程に入学し2014年6月に同課程を修了している。その後、2017年4月に同志社大学大学院理工学研究科博士後期課程に入学し、現在、正規学生として機械工学を専攻している。これらの就学期間において申請者は一貫して高分子系複合材料の特性改善に関する研究に取り組んできた。本論文の主たる内容は、Vietnam Journal of Chemistryをはじめ、Journal of Materials Science Research, Journal of Composites Scienceなどの主要な専門雑誌に、本日現在、少なくとも7編の学術論文として掲載されており、十分な評価を受けている。また本論文提出者は本論文の内容を、専門の国際会議でも研究発表をしている。

2020年1月10日15時15分より約1時間40分にわたり学術講演会が行われ、各種の質疑応答が行われた結果、提出者の説明により十分な理解が得られた。また講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した研究開発のための推進モデルや、関連する機械工学全般の諸問題につき口頭試問を実施した結果、十分な学力を有することが確認された。なお、学位申請者は英語による論文発表や国際学会での登壇による研究発表を行っており、十分な語学力を有しているものと認められる。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

## 博士學位論文要旨

論文題目 : Study on Effects of Submicron Glass Fiber Modification on Mechanical Properties of Vinyl Ester Resin and Short Carbon Fiber Reinforced Vinyl Ester Composite  
(ビニルエステル樹脂および短炭素繊維強化ビニルエステル複合材料の機械的特性のサブミクロンガラス繊維による改質効果に関する研究)

氏名 : NGUYEN NHAN THI THANH  
要旨 :

This study investigates modifying effect of submicron glass fiber (sGF) on mechanical properties of resin vinyl ester (VE) resin as well as short carbon fiber composite. The content of fiber utilized is 0.3 and 0.6 wt% (weight percentage) compared to resin. The glass fiber with diameter in the range of 0.4 to 2.4  $\mu\text{m}$  was added into VE and mixed by the conventional homogenizer at the speed 5000 rpm in 30 minutes. SEM observation showed that the length of sGF after mixing also varies in a huge range, majority of them are from 20  $\mu\text{m}$  to 200  $\mu\text{m}$ , when a minor has length around 1 mm. Therefore, the aspect ratio of sGF in polymer lies on a wide range. sGF also was seen well dispersed in resin. The bending strength, impact resistance of modified resin decreased while the Mode I fracture toughness, the elastic behavior increased with the addition of glass fiber. The glass temperature transition was unchanged, indicates the polymerization process of modified resin was not affected by the presence of sGF particles. The compact tension test was conducted under the cyclic tension load to determine the fatigue life or in the same meaning of measuring the crack propagation resistance of notched-samples. The fatigue life of submicron composite (another term of modified resin) proportionally improved with the content of glass fiber in matrix. The SEM images along with the digital microscope images confirmed the mechanisms of growing fatigue life include micro crack deflection and debonding fiber from resin. The modified and unmodified resin after that was used for preparing composite with carbon fiber at different fiber lengths (i.e. 1, 3 and 25 mm) by vacuum assisted resin transfer molding and quasi-hand layup. The later method is more suitable for dispersing well glass fiber into composite system. The mechanical properties of composites enlarged with the increase of carbon fiber length. However, strength per volume unit suddenly changed from 1 mm to 3 mm composite and that of 3 mm composite is nearly the same with 25 mm composite, suggests that 3 mm fiber length can be considered as critical fiber length of CF in these composites. Adding glass fiber did not considerably improve flexural, tensile and impact performance. By contrast, the fatigue life of composite grew significantly by sGF modification, higher content, higher number of cycle to failure. The strain distribution test with model specimens suggests that sGF delays the propagation of micro cracks resulting in the more energy dissipation and finally, the improvement of the fatigue life of modified composites. Besides, SEM images also pointed out about toughening effect matrix with smaller failure statement and the disappear of brittle fracture mode thank to the presence of sGF. Because of toughening of SGF in VE resin, the drop weight impact was carried out to expect about the improvement of impact resistance under drop weight event. Two impact energies were chosen is 10 J and 15 J. Compression

testing indicates about the high ratio of compressive strength and tensile strength in short carbon fiber composite. The random orientation of fiber creates the quasi-isotropic of this material, narrows the difference between tensile and compression performance. The energy impact of 10 J considered as the starting level causes the serious damage in composites of this research. However, the CAI (compression after impact) strength of samples sustained impact 15 J minimally reduced compared to that under 10 J. The ultrasonic inspection of impacted composites showed about the increase of delamination area. The calculations also showed the marginal decrease of absorbed energy in modified composite. However, the original compressive strength as well as the post impact compressive strength of composite were unchanged by glass fiber modification. These results are good agreement with the Izod impact test of composite fore mentioned.